I. Cinématique

Vecteur vitesse	$\overrightarrow{V(M/R_0)} = \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_{R_0}$; O : origine du repère (R_0) Si M $\in$ matériellement à (S) : $\vec{V}(M/R_0) = \vec{V}(M \in S/R_0)$
Vecteur accélération	$\overrightarrow{\Gamma(M/R_0)} = \left(\frac{d\ \overrightarrow{V(M/R_0)}}{dt}\right)_{R_0}$
Formule de la dérivation vectorielle	$\left(\frac{d\vec{U}(t)}{dt}\right)_R = \left(\frac{d\vec{U}(t)}{dt}\right)_{R_i} + \vec{\Omega}(R_i/R) \wedge \vec{U}(t)$
Champ des vecteurs vitesses	$\vec{V}(B \in S/R) = \vec{V}(A \in S/R) + \overrightarrow{BA} \wedge \vec{\Omega}(S/R)$
Torseur cinématique des liaisons normalisées	$\{\vartheta(S_2/S_1)\} = \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}(S_2/S_1) \\ \vec{V}(A \in S_2/S_1) \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} w_x.\vec{x} + w_y.\vec{y} + w_z.\vec{z} \\ v_x.\vec{x} + v_y.\vec{y} + v_z.\vec{z} \end{Bmatrix}_A = {}_A\begin{Bmatrix} w_x & v_x \\ w_y & v_y \\ w_z & v_z \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Composition des vecteurs vitesses	$\vec{V}(M/R_0) = \vec{V}(M/R_1) + \vec{V}(M \in R_1/R_0)$ $\vec{V}(M/R_0)$: Vitesse absolue ; $\vec{V}(M/R_1)$: Vitesse relative $\vec{V}(M \in R_1/R_0)$: Vitesse d'entraînement
Composition des vecteurs rotation	$\vec{\Omega}(S/R_0) = \vec{\Omega}(S/R_1) + \vec{\Omega}(R_1/R_0)$
Compositions des vecteurs accélérations	$\vec{\Gamma}(M/R_0) = \vec{\Gamma}(M/R_1) + \vec{\Gamma}(M \in R_1/R_0) + 2.\vec{\Omega}(R_1/R_0) \wedge \vec{V}(M/R_1)$ $\vec{\Gamma}(M/R_0)$: Accélération absolue ; $\vec{\Gamma}(M/R_1)$: Accélération relative $\vec{\Gamma}(M \in R_1/R_0)$: Accélération d'entraînement $2.\vec{\Omega}(R_1/R_0) \wedge \vec{V}(M/R_1)$: Accélération de Coriolis
Vecteur vitesse de rotation de roulement et de pivotement	$\vec{\Omega}(S_2/S_1) = \vec{\Omega}_n(S_2/S_1) + \vec{\Omega}_t(S_2/S_1)$ $\vec{\Omega}_n(S_2/S_1)$: vecteur vitesse de rotation de pivotement $\vec{\Omega}_t(S_2/S_1)$: vecteur vitesse de rotation de roulement
Roulement sans glissement	I : point de contact entre S2 et S1 $\Rightarrow \vec{V}(I \in S_2/S_1) = \vec{0}$
Fermeture géométrique *(chaines fermées)*	*Somme vectorielle nulle : La loi entrée sortie géométrique est déterminée par la projection sur les vecteurs unitaire d'une base unique.*
Fermeture cinématique *(chaines fermées)*	*La loi entrée sortie cinématique est déterminée par la composition des vecteurs vitesses, ou bien par dérivation de la loi entrée sortie géométrique.*

Liaisons en parallèles	**Liaisons en série**
$\{\vartheta_{eq}(S2/S1)\} = \{\vartheta_{Li}(S2/S1)\}$; $\forall i$ **degré de mobilité : m** = degré de mobilité de la liaison équivalente.	$\{\vartheta_{eq}(S_n/S_0)\} = \sum_{i=1}^{n} \{\vartheta(S_i/S_{i-1})\}$ **m** = $Nc = \sum_{i=1}^{n} n_{ci}$; $\mathbf{m_u = n_{céq}}$; $\mathbf{m_i = m - m_u}$

Cinématique graphique (Exigée seulement en CNC)

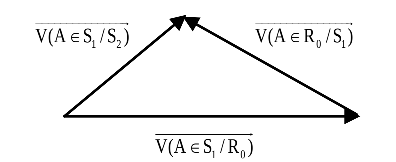
Equiprojectivité

$\vec{V}(B \in S/R_0).\overrightarrow{AB} = \vec{V}(A \in S/R_0).\overrightarrow{AB} \quad \Rightarrow \quad \text{AH = BK}$

Utilisation : si on a une vitesse d'un point et la direction d'un autre point, on peut déduire la norme et le sens de la vitesse du deuxième point.

Composition des vecteurs vitesses

$\vec{V}(A \in S_1/S_2) = \vec{V}(A \in S_1/R_0) + \vec{V}(A \in R_0/S_2)$: Si on a une vitesse et les directions des deux autres vitesses $\Longrightarrow$ La fermeture vectorielle permet de déterminer le sens et la norme des deux vitesses.



Centre instantané de rotation :CIR

La vitesse du CIR est nulle à l'instant considéré : $\vec{V}(I \in S/R_0) = \vec{0}$

1- Détermination du CIR : $I = \left[\perp \vec{V}(A \in S/R_0)\right] \cap \left[\perp \vec{V}(B \in S/R_0)\right]$

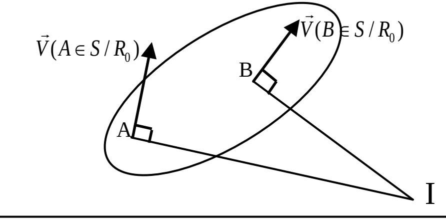
2- Connaissant le CIR et $\vec{V}(M \in S/R_0)$, on peut déterminer le vecteur vitesse de n'importe quel autre point N de (S)/R_0.

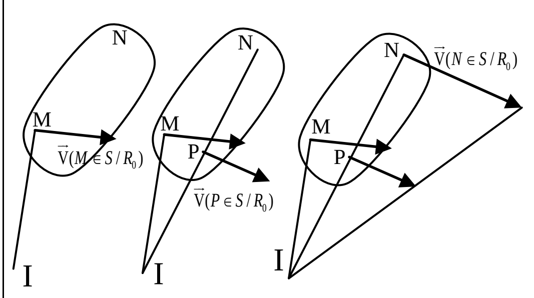
$$\vec{V}(I \in S/R_0) = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \frac{\left\|\vec{V}(M \in S/R)\right\|}{\left\|\vec{V}(N \in S/R)\right\|} = \frac{\left\|\overrightarrow{MI}\right\|}{\left\|\overrightarrow{NI}\right\|}$$

- Soit le point P, tq $P \in (IN)$ et $\left\|\overrightarrow{IM}\right\| = \left\|\overrightarrow{IP}\right\|$

$\Rightarrow \quad \left\|\vec{V}(p \in S/R_0)\right\| = \left\|\vec{V}(M \in S/R_0)\right\|$

- N, P et I sont alignés : Fermeture triangulaire





II. Statique

Torseur des actions mécaniques dans le cas du contact surfacique	$\left\{\tau(S_1 \to S_2)\right\} = \begin{Bmatrix} \int_{M \in S} \vec{f}_M(S_1 \to S_2).ds \\ \int_{M \in S} \overrightarrow{AM} \wedge \vec{f}_M(S_1 \to S_2).ds \end{Bmatrix}_A$; $\begin{cases} \vec{f}_M(S_1 \to S_2) = \vec{f}_n(S_1 \to S_2) + \vec{f}_t(S_1 \to S_2) \\ \Rightarrow \vec{f}_M(S_1 \to S_2) = -p(M)\left[\vec{n}(M) + f.\vec{t}(M)\right] \end{cases}$
Lois de coulomb	$\vec{V}(M \in S_2/S_1) \neq \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \vec{f}_t(S_1 \to S_2) \wedge \vec{V}(M \in S_2/S_1) = \vec{0} \\ \vec{f}_t(S_1 \to S_2) \cdot \vec{V}(M \in S_2/S_1) < 0 \end{cases}$ et $\left\|\vec{f}_t(S_1 \to S_2)\right\| = f.\left\|\vec{f}_n(S_1 \to S_2)\right\|$ $\vec{V}(M \in S_2/S_1) = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \left\|\vec{f}_t(S_1 \to S_2)\right\| \leq f.\left\|\vec{f}_n(S_1 \to S_2)\right\|$
Torseur statique des liaisons normalisées	$\left\{\tau(S_1 \to S_2)\right\} = \begin{Bmatrix} \vec{R}(S_1 \to S_2) \\ \vec{M}_A(S_1 \to S_2) \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} X.\vec{x} + Y.\vec{y} + Z.\vec{z} \\ L.\vec{x} + M.\vec{y} + N.\vec{z} \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} X & L \\ Y & M \\ Z & N \end{Bmatrix}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$ $\overrightarrow{M}_B(S_1 \to S_2) = \overrightarrow{M}_A(S_1 \to S_2) + \overrightarrow{BA} \wedge \vec{R}(S_1 \to S_2)$
Principe fondamental de la statique :PFS	$\left\{\tau(\bar{E} \to E)\right\} = \left\{\vec{0}\right\} \Rightarrow$ TRS : $\vec{R}(\bar{E} \to E) = \vec{0}$ et TMS : $\vec{M}_A(\bar{E} \to E) = \vec{0}$
Conséquences du PFS	*- Solide soumis à l'action de 2 forces* $\longrightarrow$ *ces deux 2 sont directement opposées.* *- Si un solide est en équilibre sous l'action de trois forces. Ces forces sont : coplanaires, concourantes en un même point (triangle des forces) ou parallèles.*
Liaisons en parallèles : $\left\{\tau_{eq}(S1 \to S2)\right\} = \sum_{i=1}^{n} \left\{\tau(S1 \xrightarrow{Li} S2)\right\}$	**Liaisons en série :** $\left\{\tau_{eq}(S_0 \to S_n)\right\} = \left\{\tau(S_i \xrightarrow{Li} S_{i+1})\right\}$, $\forall i$

III. Systèmes de transmission de mouvement

Système vis-écrou : Liaison hélicoïdale

Hélice à droite / Hélice à gauche

$$\vec{V}(M \in S_2/S_1) = \pm \frac{pas}{2\pi} . \vec{\Omega}(S_2/S_1)$$

NB : En statique c'est l'inverse : $\vec{x}.\vec{M}_A(S_1 \to S_2) = \mp \frac{pas}{2\pi} \vec{x}.\vec{R}(S_1 \to S_2)$

($L(S_1/S_2)$ = hélicoïdale d'axe $(A, \vec{x})$)

Réducteur

Pour un réducteur et en régime permanent:

La puissance du moteur=La puissance du sortie du réducteur.

$$C_m w_m = C_{sr} w_{sr}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{w_{sr}}{w_m} = \frac{C_m}{C_{sr}}$$

$w_{sr} < w_m$ et $C_m < C_{sr}$

☝Le réducteur permet en même temps la réduction de la vitesse de rotation et l'augmentation du couple.

Engrenages

1. *Engrenage simple (axes parallèles)*

Contact extérieur : $r = \frac{w_2}{w_1} = -\frac{d_1}{d_2} = -\frac{z_1}{z_2}$; Contact intérieur : $r = \frac{w_2}{w_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2}$

2. *Engrenage conique*

$r = \frac{w_2}{w_1} = \pm \frac{d_1}{d_2}$; le signe dépend du sens du repère utilisé.

3. *Train d'engrenages simples*

$$r = \frac{w_s}{w_e} = (-1)^n . \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}}$$

n : nombre de contacts extérieurs.

4. *Trains épicycloïdaux*

Relation de Willis :

$$\frac{w_{planétaire(S)} - w_{PS}}{w_{Planétaire(E)} - w_{PS}} = (-1)^n . \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}}$$

Poulies courroie et pignons chaines : $r = \frac{w_2}{w_1} = \frac{d_1}{d_2}$

IV. Cinétique

1. Centre d'inertie

- Centre d'inertie d'un solide S de masse m : $\int_{p\in S} \overrightarrow{GP}.\, dm = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \overrightarrow{OG} = \frac{1}{m} \int_{p \in S} \overrightarrow{OP}.\, dm$.

- Centre d'inertie d'un ensemble matériel : $\left(\sum_{i=1}^{n} m_i\right).\overrightarrow{OG} = \sum_{i=1}^{n} m_i \overrightarrow{OG_i}$.

- **Théorèmes de Guldin** (solides de révolution) **:** 1er théorème : $S = L.2\pi r_G$; 2er théorème : $V = S.2\pi r_G$

2. Matrice d'inertie

$$[I_O(S)] = \begin{bmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

: Matrice d'inertie du solide (S) au point O dans la base $(\vec{x},\vec{y},\vec{z})$.

3. Influence des symétries sur la forme de la matrice d'inertie

- un plan de symétrie permet d'annuler deux produits d'inertie.

$(\vec{x},\vec{y}) \rightarrow$ D=0 et E=0 ; $(\vec{x},\vec{z}) \rightarrow$ D=0 et F=0 ; $(\vec{y},\vec{z}) \rightarrow$ E=0 et F=0

- Deux plans de symétrie permettent d'annuler tous les produits d'inertie.
- Axe de révolution permet d'annuler tous les produits d'inertie et les deux moments d'inertie par rapport aux axes perpendiculaire à l'axe de révolution sont égaux.

La matrice reste la même dans toute base admettant l'axe de révolution comme troisième axe.

Moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe $\Delta(O,\vec{\delta})$: $I_\Delta(S)=\vec{\delta}.\left(\left[\overline{\overline{I}}_O(S)\right].\vec{\delta}\right)$

4. Théorème de Huygens

Un solide(S) (masse m, centre de gravité G et A un point quelconque), avec $\overrightarrow{AG} = x_G\vec{x} + y_G\vec{y} + z_G\vec{z}$.

$$\left[I_A(S)\right] = \left[I_G(S)\right] + \left[I_A(G(m))\right]$$

Avec $\left[I_O(G(m))\right]$: matrice d'inertie au point A du point matériel G de masse m(S).

$$\left[I_A(G(m))\right] = m\begin{bmatrix} y_G^{\ 2}+z_G^{\ 2} & -x_Gy_G & -z_Gx_G \\ -x_Gy_G & z_G^{\ 2}+x_G^{\ 2} & -y_Gz_G \\ -z_Gx_G & -y_Gz_G & x_G^{\ 2}+y_G^{\ 2} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} A_A = A_G + m(y_G^{\ 2}+z_G^{\ 2}) \\ B_A = B_G + m(z_G^{\ 2}+x_G^{\ 2}) \\ C_A = C_G + m(x_G^{\ 2}+y_G^{\ 2}) \end{cases} ; \begin{cases} D_A = D_G + my_Gz_G \\ E_A = E_G + mz_Gx_G \\ F_A = F_G + mx_Gy_G \end{cases}$$

5. Torseur cinétique :

$$\left\{C(E/R)\right\} = \begin{Bmatrix} \int_{p\in E} \vec{V}(P/R)dm \\ \int_{p\in E} \overrightarrow{AP}\wedge\vec{V}(P/R)dm \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} m\vec{V}(G/R) \\ \vec{\sigma}_A(E/R) \end{Bmatrix}_A$$

Moment cinétique : $$\vec{\sigma}_A(S/R) = \left[\overline{\overline{I}}_A(S)\right].\vec{\Omega}(S/R) + m.\overrightarrow{AG}\wedge\vec{V}(A\in S/R)$$

(NB : vérifier si A є matériellement à S, si non il faut faire un changement de point)

- Relation de changement de point : $\vec{\sigma}_B(E/R) = \vec{\sigma}_A(E/R) + \overrightarrow{BA}\wedge m\vec{V}(G\in S/R)$

6. Torseur dynamique :

$$\left\{D(E/R)\right\} = \begin{Bmatrix} \int_{p\in E} \vec{\Gamma}(P/R)dm \\ \int_{p\in E} \overrightarrow{AP}\wedge\vec{\Gamma}(P/R)dm \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} m\vec{\Gamma}(G/R) \\ \vec{\delta}_A(E/R) \end{Bmatrix}_A$$

Relation de changement de point du moment dynamique : $\vec{\delta}_B(E/R) = \vec{\delta}_A(E/R) + \overrightarrow{BA}\wedge m\vec{\Gamma}(G/R)$

7. Relation entre le moment cinétique et le moment dynamique :

$$\vec{\delta}_A(E/R) = \left[\frac{d(\vec{\sigma}_A(E/R))}{dt}\right]_R + \vec{V}(A/R)\wedge m.\vec{V}(G/R)$$; avec $\vec{V}(A/R) = \left[\frac{d(\overrightarrow{OA})}{dt}\right]_R$.

8. Energie cinétique d'un solide indéformable :

$$T(S/R) = \frac{1}{2}\left\{C(S/R)\right\}\otimes\left\{\vartheta(S/R)\right\} \Rightarrow T(S/R) = \frac{1}{2}\begin{Bmatrix} m\vec{V}(G/R) \\ \vec{\sigma}_A(S/R) \end{Bmatrix}\otimes\begin{Bmatrix} \vec{\Omega}(S/R) \\ \vec{V}(A\in S/R) \end{Bmatrix}$$

$$T(S/R)=\frac{1}{2}\vec{\sigma}_A(S/R).\vec{\Omega}(S/R)+\frac{1}{2}m\vec{V}(G/R).\vec{V}(A\in S/R)$$.

Au point G : $T(S/R)=\frac{1}{2}\vec{\sigma}_G(S/R).\vec{\Omega}(S/R)+\frac{1}{2}m\vec{V}(G/R)^2$

Solide en rotation autour d'un axe fixe (Δ) : $T(S/R)=\frac{1}{2}J_\Delta w_\Delta^2$; Solide en translation : $T(S/R)=\frac{1}{2}m\vec{V}(G/R)^2$

9. <u>Eléments cinétiques d'un ensemble de solides</u> :

Soit (E) un système de n solides (S_i) en mouvement par rapport au repère R : $T(E/R)=\sum_{i=1}^{n}T(S_i/R)$

$$\{\mathbb{C}(E/R)\}=\sum_{i=1}^{n}\{\mathbb{C}(S_i/R\}=\begin{Bmatrix} m_E.\vec{V}(G_E/R)=\sum_{i=1}^{n}m_i\vec{V}(G_i/R) \\ \vec{\sigma}_A(E/R)=\sum_{i=1}^{n}\vec{\sigma}_A(S_i/R)\end{Bmatrix};\quad \{D(E/R)\}=\sum_{i=1}^{n}\{D(S_i/R\}=\begin{Bmatrix} m_E\vec{\Gamma}(G_E/R)=\sum_{i=1}^{n}m_i\vec{\Gamma}(G_i/R) \\ \vec{\delta}_A(E/R)=\sum_{i=1}^{n}\vec{\delta}_A(S_i/R)\end{Bmatrix}.$$

10. <u>Moment d'inertie équivalent ramené à un axe Δ</u> :$I_{éq\Delta}$

On calcul l'énergie cinétique de l'ensemble des solides(Σ), puis par identification on détermine $I_{éq\Delta}$:

$T(\Sigma/Rg)=\sum_{1}^{n}T(S_i/Rg)=\frac{1}{2}I_{éq\Delta}w_\Delta^2$.

V. <u>Dynamique des solides</u>

1. <u>Principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

$$\{D(\Sigma/Rg)\}=\{\mathcal{T}(\bar{\Sigma}\to\Sigma)\}\Rightarrow\begin{Bmatrix} m_\Sigma.\vec{\Gamma}(G_\Sigma/Rg) \\ \vec{\delta}_A(\Sigma/Rg)\end{Bmatrix}_A=\begin{Bmatrix} \vec{R}(\bar{\Sigma}\to\Sigma) \\ \vec{M}_A(\bar{\Sigma}\to\Sigma)\end{Bmatrix}_A$$

Théorèmes généraux de la dynamique

- **Théorème de la résultante dynamique (**TRD) : $\vec{R}(\bar{\Sigma}\to\Sigma)=m_\Sigma.\vec{\Gamma}(G_\Sigma/Rg)$
- **Théorème du moment** dynamique (TMD) : $\vec{M}_A(\bar{\Sigma}\to\Sigma)=\vec{\delta}_A(\Sigma/Rg)$

2. <u>Equations différentielles du mouvement</u>

Une équation de mouvement est une équation différentielle du second ordre traduisant les théorèmes généraux, dans laquelle ne figure aucune composante inconnue des actions mécaniques.

- Chaîne ouverte : nombre d'équations différentielles de mouvement = nombre de mouvements motorisés dans les liaisons= nombre d'isolements ;

La frontière d'isolement doit être en intersection avec une seule liaison (translation : TRD, rotation : TMD).

- Chaîne fermée :

1- L'application des **TG** dépend du mouvement des pièces du système étudié (- rechercher et traiter les ensembles soumis à 2 forces et de masses ou inerties négligeables afin de réduire le paramétrage ;

- isoler solide après solide en partant de l'entrée jusqu'à l'action souhaitée.

- Pour les isolements en intersection avec le bâti, il faut appliquer le théorème permettant d'éviter la présence des inconnues de liaisons dans les équations).

2- Le **TEC** s'applique sur l'ensemble en mouvement pour les systèmes ayant un seul degré de liberté (un seul actionneur).

3. <u>Equilibrage statique et dynamique des corps tournants</u>

-Un solide est statiquement équilibré si le centre d'inertie G est sur l'axe de rotation.

-Un solide est dynamiquement équilibré lorsque son axe de rotation est un axe principal d'inertie.

VI. Puissance et énergie

1. Puissance des efforts extérieurs

Cas du solide indéformable : $P(\overline{S} \to S/R) = \{\tau(\overline{S} \to S)\} \otimes \{\vartheta(S/R)\}$

$$P(\overline{S} \to S/R) = \begin{Bmatrix} \vec{R}(\overline{S} \to S) \\ \vec{M}_A(\overline{S} \to S) \end{Bmatrix}_A \otimes \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}(S/R) \\ \vec{V}(A \in S/R) \end{Bmatrix} = \vec{R}(\overline{S} \to S).\vec{V}(A \in S/R) + \vec{M}_A(\overline{S} \to S).\vec{\Omega}(S/R)$$

Puissance du champ des forces de la pesanteur : $P(Pesanteur \to S_i/R) = m_i\vec{g}.\vec{V}(G_i/R)$

2. Puissance des inter-efforts entre deux solides

$$P_{\text{int}}(S_i;S_j) = P(S_i \leftrightarrow S_j) = \{\tau(S_i \to S_j)\} \otimes \{V(S_j/S_i)\}$$

Si la liaison entre deux solides S_i et S_j est **parfaite** (contact sans frottement), alors $P(S_i \leftrightarrow S_j) = 0$.

$$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = \begin{Bmatrix} \vec{R}(S_1 \to S_2) \\ \vec{M}_A(S_1 \to S_2) \end{Bmatrix}_A \otimes \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}(S_2/S_1) \\ \vec{V}(A \in S_2/S_1) \end{Bmatrix}$$

$$P(\overline{S} \to S/R) = \vec{R}(S_1 \to S_2).\vec{V}(A \in S_2/S_1) + \vec{M}_A(S_1 \to S_2).\vec{\Omega}(S_2/S_1).$$

- Pratiquement pour un moteur $P(S_1 \xleftrightarrow{Mot} S_2) = \vec{C}_{1\to 2}.\vec{\Omega}(2/1)$ et pour un vérin $P(S_1 \xleftrightarrow{Mot} S_2) = \vec{F}_{1\to 2}.\vec{V}_{2/1}$.
- Cas d'un ressort de traction - compression, la puissance développée est : $P(S_1 \xleftrightarrow{r} S_2) = -k(l-l_0)\dfrac{dl}{dt}$.
- Cas d'un ressort de torsion, la puissance développée est : $P(S_1 \xleftrightarrow{r} S_2) = -C(\theta-\theta_0)\dfrac{d\theta}{dt}$.
- Pour toute liaison **non parfaite**, la puissance des inter-efforts est <u>négative</u> (puissance dissipée) :

Type de Frottement	Puissance dissipée par frottement : $P(S_1 \leftrightarrow S_2)<0$		
	Translation	Rotation	
sec	$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = -f.N.v_g$ f : facteur de frottement	$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = -\mu.N.\dot{\theta}_R$ μ : paramètre de résistance au roulement	$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = -\eta.N.\dot{\theta}_P$ μ : paramètre de résistance au pivotement
visqueux	$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = -f.v_g^2$ f : coef de frottement visqueux	$P(S_1 \leftrightarrow S_2) = -\mu.\dot{\theta}^2$ μ : coefficient de frottement visqueux rotatif	

- Puissance perdue : $P_{perdue} = (1-\eta)P_{entrée}$; Rendement : $\eta = P_{sortie}/P_{entrée}$

3. Théorème de l'énergie cinétique (TEC)

<u>Cas d'un solide (S)</u>

$$\frac{d}{dt}T(S/R_g) = P(\overline{S} \to S/R_g)$$

<u>Cas d'un ensemble de solides (E)</u>

$$\frac{d}{dt}T(E/R_g) = P(\overline{E} \to E/R_g) + P_{\text{int}}(E)$$

On utilise fréquemment le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer la loi entrée-sortie d'un système à une seule mobilité (mécanismes en chaînes fermées).